

УДК 693.54.4:620.192.52:693.547

# УСАДОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА. ПРИЧИНЫ И СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. **Н.Н. КАЛИНОВСКАЯ;**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)  
канд. техн. наук **Д.С. КОТОВ; Е.В. ЩЕРБИЦКАЯ**  
(Институт БелНИИС, Минск)

Рассматриваются причины образования в бетонных конструкциях различного рода трещин, влияние таких деформаций на их эксплуатационные свойства и долговечность. Представлены результаты анализа причин появления внутренних напряжений, приводящих к трещинообразованию в элементе с учетом всех стадий его производства. Приведены данные по влиянию SRA-добавки на потерю влаги из бетонной смеси в возрасте до 20 часов, а также сравнение появления трещин в свежесформованном бетоне в сопоставлении с бездобавочным составом бетона.

**Ключевые слова:** модифицированные бетоны, усадка бетона, трещинообразование, расширяющиеся добавки, добавки SRA, кинетика набора прочности.

**Введение.** В Республике Беларусь, как и во всей мировой строительной отрасли, значительную область композиционных материалов нового поколения занимают модифицированные высококачественные бетоны. Среди наиболее часто применяемых на строительных объектах можно отметить высокопрочные, коррозионно-стойкие, жаростойкие и т.п. бетоны, а также бетонные смеси, характеризующиеся высокой подвижностью, вплоть до обеспечения однородности структуры бетона без применения вибрации, так называемые самоуплотняющиеся. Отличительной особенностью данных видов бетона является применение различного рода химических добавок и (или) тонкодисперсных наполнителей для обеспечения заданных физико-механических характеристик, таких как: прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, удобоукладываемость, качество лицевой поверхности и т.д. Вопрос долговечности для конструкций, изготовленных с применением данных видов бетонов, все еще остается открытым.

Общеизвестно, что одним из наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на долговечность монолитных и сборных конструкций, является появление и развитие различного рода трещин. С некоторой степенью упрощения различные виды трещин и причины их проявления представим в таблице 1.

Таблица 1. – Виды трещин и причины их проявления в конструкциях

Деформации свежесформованного бетона	Образование трещин в свежесформованном бетоне из-за перемещения опалубки, основания или иных технологических причин
Пластическая усадка	Усадка свежесформованной бетонной смеси из-за седиментации и испарения воды с поверхности конструкции
Химическая усадка	Уменьшение объема вследствие гидратации
Аутогенная усадка	Деформация теплоизолированного невымораживающего образца, так называемое самовысушивание бетона при низких значениях водоцементного отношения
Влажностная усадка	Потеря воды затвердевшего бетона в среде с недостаточной влажностью
Температурные деформации массивных конструкций	Появление напряжений в бетоне массивных конструкций из-за недопустимого градиента температуры
Силовое воздействие	Ошибки при расчете конструкции, изготовлении, эксплуатации и т.д.
Коррозия арматуры	Расклинивающее действие продуктов коррозии
Реакция между реакционно-способным кремнеземом и щелочами цемента	На поверхности заполнителя образуется гель, набухающий при контакте с водой
Карбонизация	$\text{CO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ – развивается в течении многих лет, приводит к коррозии арматуры

Следует отметить, что трещины, вызванные сверхнормативными деформациями конструкций, а также силовыми воздействиями, нарушениями технологии изготовления, ошибками при проектировании или неправильными назначениями проектных требований и т.д., плохо прогнозируются, и данный вопрос требует дополнительного всестороннего изучения. Изучению же усадочных деформаций посвящено значительное число работ [1–10], в которых исследователями рассматривается влияние различных факторов на величину усадки бетона и железобетона и предлагаются уточненные методики расчета ее значений на стадии проектирования конструктивных систем зданий и сооружений.

Из данных рисунка 1 и результатов экспериментов, приведенных в [11], можно сделать вывод об основных особенностях усадки высококачественного бетона по сравнению с традиционным бетоном:

- общая усадка, т.е. сумма аутогенной усадки и влажностной усадки, ниже для высококачественного бетона, чем для традиционного бетона;
- составляющая часть влажностной усадки значительно ниже для высококачественного бетона, в то время как компонент аутогенной усадки очевидно увеличивается;
- развитие во времени функции суммарной усадки для высококачественного бетона аналогично традиционному бетону;
- влияние на развитие усадки таких параметров, как возраст к моменту окончания влажностного хранения, тип цемента, различно для высококачественного и традиционного бетонов.

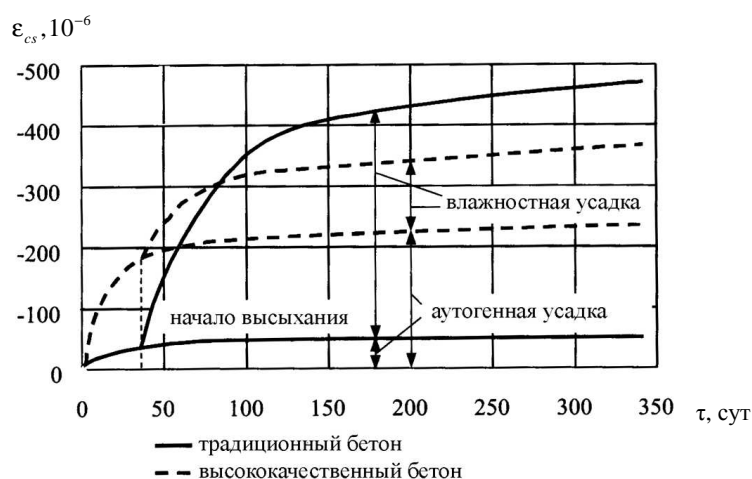


Рисунок 1. – Развитие усадки во времени для традиционного и высококачественного бетона

Наиболее полно методика определения деформаций усадки бетона и железобетонных конструкций рассмотрена в работах [9; 10]. В них показано, что деформации усадки бетона обуславливаются множеством факторов конструктивного и технологического характера. Но для инженерных расчетов могут быть выявлены обобщающие факторы, позволяющие осуществлять с достаточной достоверностью расчеты усадки бетона железобетонных конструкций. Как отмечается в [12], расчетная методика требует уточнения в связи с применением химических модификаторов и (или) тонкодисперсных минеральных наполнителей в бетонной смеси, что может в значительной степени изменять физико-механические характеристики бетона, такие как степень гидратации цемента, сроки схватывания, прочность в раннем возрасте и т.д., а соответственно и деформации усадки.

В EN 1992-2-1 [13] и в СНБ 5.03.01-02 [14], а также в DIN EN 1992-1-1 [15] представлена инженерная методика расчета усадки бетона  $\epsilon_{cs}$ , в которой ее величина рассчитывается по следующей формуле:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cs,d} + \epsilon_{cs,a},$$

где  $\epsilon_{cs,d}$  — часть усадки бетона, обусловленная испарением из него влаги;  $\epsilon_{cs,a}$  — часть усадки бетона, обусловленная процессами твердения бетона.

Наиболее значительный вклад в усадочные деформации конструкции имеет влажностная усадка. В этой связи исследования, связанные с ее изучением, а также изучением различных методов и материалов, позволяющих снизить значение влажностной усадки, являются актуальными.

#### Пути снижения влажностной усадки бетона

По нашему мнению, наиболее эффективными методами снижения влажностной усадки являются:

- осуществление качественного и своевременного влажностного ухода за конструкцией;
- компенсация усадки с помощью расширяющих минеральных добавок;

- уменьшение усадки за счет специальных химических добавок на основе гликолей, известных в англоязычной литературе как Shrinkage Reducing Admixtures (далее – SRA).

Первый представленный метод снижения усадки достаточно подробно описан в различных нормативных документах по возведению конструкций и имеет наибольшее распространение, однако зачастую он не может быть реализован в условиях современного строительства.

Широко распространенные расширяющие добавки действуют благодаря образованию этtringита (сульфоалюминатные добавки) или гидроксида кальция, или (значительно реже) магния (добавки на основе CaO и MgO).

Расширяющие добавки используются с 1980-х годов. Многолетний опыт их использования позволил выявить некоторые недостатки применения данных модификаторов. Образование этtringита требует около 5...7 дней для полной реализации потенциала расширения, и весь этот период должен осуществляться качественный влажностный уход за бетоном. Данное требование не всегда выполнимо, особенно для вертикальных конструкций.

Добавки на основе CaO действуют в течение 1...2 суток и, следовательно, требовательны к набору прочности. Согласно литературным данным [16], 75% расширяющего действия проявляется в течение первых 12 часов твердения. Таким образом, данные добавки эффективны в быстротвердеющих бетонах, прочность которых за первые сутки твердения достигает 10...20 МПа [16].

Кроме этого минеральные расширяющие добавки не технологичны – поставляются только в сухом виде и имеют высокие дозировки (обычно 10% от массы цемента).

Добавки SRA – химические вещества, уменьшающие влажностную и аутогенную усадку бетона в дозировке 1...2% от массы цемента. Несмотря на относительно малый опыт использования данных модификаторов, они нашли широкое применение благодаря доказанной эффективности и легкости применения.

Если расширяющие добавки действуют за счет химической реакции, в результате которой образуются вещества с большим объемом, чем у исходных компонентов, принцип действия SRA-добавок до конца не выяснен. Большинство исследователей, в частности [16], полагают, что SRA снижают усадку за счет двух основных эффектов: 1) снижения поверхностного натяжения поровой жидкости в бетоне, 2) уменьшения испарения воды с поверхности бетона.

Снижение поверхностного натяжения описывается уравнением Лапласа:

$$\Delta P = \frac{\sigma \cdot \cos \Theta}{R},$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $R$  – радиус капилляра;  $\Theta$  – краевой угол смачивания.

Снижение перепада давления на менисках в капиллярных порах, хаотично располагающихся в теле бетона, приводит к уменьшению растягивающих напряжений в бетоне, которые и являются причиной образования трещин. Следует отметить, что многие широко используемые химические добавки для бетона, в частности пластификаторы, также снижают поверхностное натяжение поровой жидкости, не оказывая при этом заметного влияния на усадку бетона. По графику изменения поверхностного натяжения добавки «Полипласт Оптима» (рисунок 2) видно, что при концентрации добавки от 0 до 17% изменение поверхностного натяжения носит практически линейный характер. При концентрации более 17% начинается плато, т.е. увеличение концентрации практически не сказывается на поверхностном натяжении.

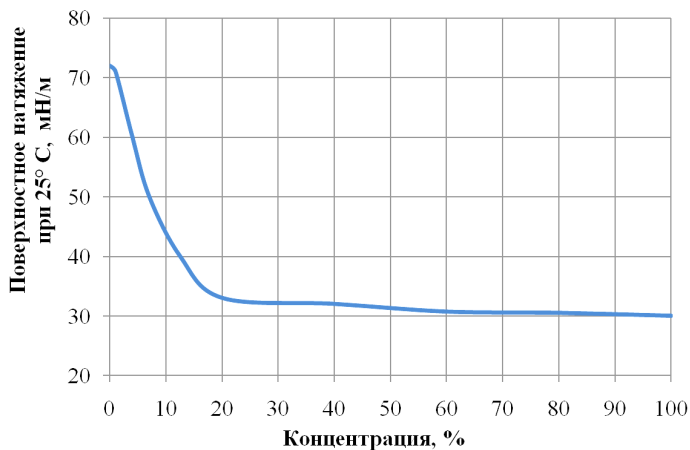


Рисунок 2. – Зависимость поверхностного натяжения водного раствора Полипласт Оптима от концентрации добавки «растворитель – деионизированная вода»

В реальных бетонах дозировка SRA-добавок составляет до 1,5% от массы цемента в расчете на 100%-ное вещество. То есть дозировка SRA от массы воды затворения составляет от 2 до 5% для бетона с расходом цемента 350 кг/м<sup>3</sup> и водоцементным отношением соответственно от 0,3 до 0,7.

До недавнего времени применение SRA-добавок в России и Беларуси сдерживалось высокой ценой – 5...12 €/кг, поскольку данные добавки были исключительно импортного производства.

#### Влияние SRA-добавок на основные свойства бетона

Для изучения влияния добавки «Полипласт Оптима» на усадочные деформации бетона были выполнены лабораторные исследования относительных деформаций в зависимости от условий выдерживания образцов-призм размером 100×100×400 мм, которые в течение первых 56 суток твердения выдерживались при относительной влажности 60 и 80%. Изменения относительных деформаций образцов с «Полипласт Оптима» сравнивались с контрольным составом, а также сульфоалюминатным модификатором белорусского производства (далее – С/А).

Полученные данные свидетельствуют о том, что при выдерживании в среде с влажностью 60% (может быть приравнено к отсутствию ухода за бетоном) добавка «Полипласт Оптима» уменьшила усадку бетона в 1,3... 2,4 раза в зависимости от возраста. При этом усадочные деформации бетона с сульфоалюминатным модификатором практически равны таковым для бетона без расширяющей добавки, что подтверждает особую важность обеспечения влажностного ухода для С/А модификаторов.

В случае влажности 80% наименьшая усадка была у образцов с С/А добавкой, при этом «Полипласт Оптима» также показала уменьшение усадки в 1,5...2 раза относительно контрольного состава.

Согласно [17], SRA-добавки могут оказывать отрицательное влияние на прочность бетона, что необходимо учитывать при проектировании его состава.

Для определения влияния добавки «Полипласт Оптима» на прочность бетона было изготовлено 2 серии образцов с различным содержанием цемента. Результаты испытаний показывают, что SRA-добавки замедляют скорость набора прочности бетона. Рабочая дозировка добавки «Полипласт Оптима», составляющая 1%, снижает темп набора прочности на 7,5% в возрасте 28 суток, что должно учитываться при подборе состава бетона. Эффект замедления набора прочности может быть использован при бетонировании массивных сооружений для уменьшения температурных деформаций, вызванных саморазогревом массива при гидратации цемента.

Необходимо также отметить, что определение деформаций усадки по ГОСТ 24452-80 начинается после распалубки образцов, как правило, через 24 часа после укладки бетона. Однако в производственных условиях (например, при бетонировании бетонных полов) возникает проблема усадки свежесформованного бетона, которая начинается уже через 2...4 часа после уплотнения бетонной смеси. Один из наиболее показательных методов определения усадки бетона в течение первых суток твердения – испытание по ASTM C 1579, суть которого заключается в твердении бетона в условиях ограниченных деформаций в специальной форме с ребрами жесткости, которые являются местами концентрации напряжений. При этом твердение бетона происходит в экстремальных условиях, способствующих скорейшему образованию трещин при влажности 30% и под воздействием направленного теплового потока. Общий вид формы представлен на рисунке 3.

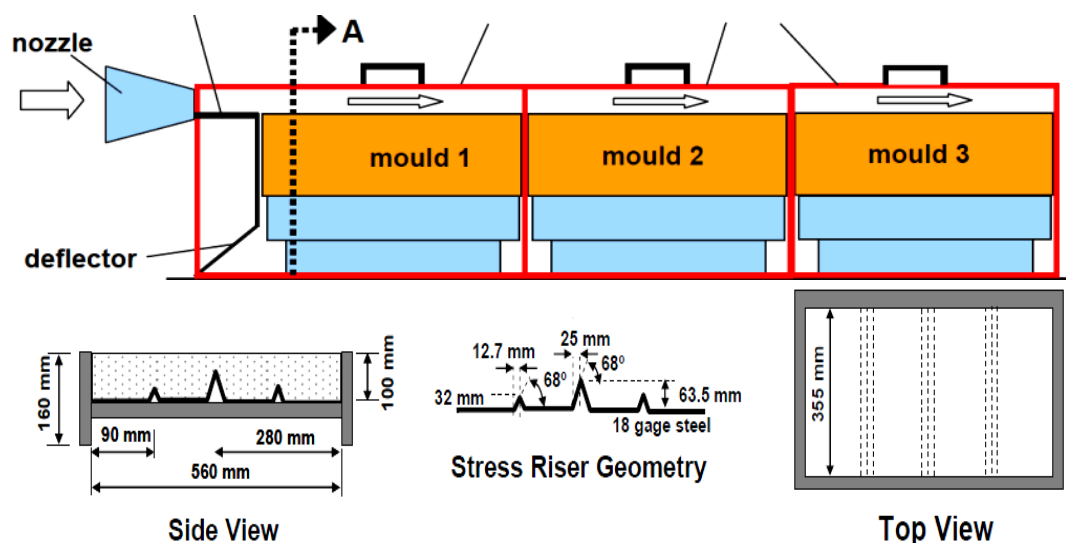

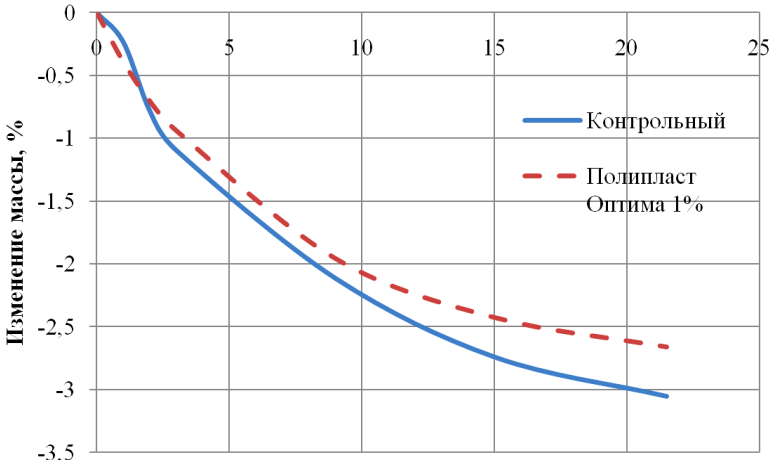


Рисунок 3. – Схематическое изображение испытания по ASTM C 1579

Данное исследование позволяет определить наличие трещин на поверхности образца и ширины их раскрытия, а также потерю влаги с поверхности образца.

Фактические измерения проводились в первые 2 суток твердения бетона. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты измерения в первые 2 суток твердения бетона

Показатель	Без добавки	С добавкой «Полипласт Оптима» 1%																					
Наличие и ширина раскрытия трещин	<p>Одна центральная трещина, ширина раскрытия до 1 мм</p> 	<p>Трещин нет</p>																					
Количество испаренной влаги с поверхности образца	<p style="text-align: center;">Время, часы</p>  <table border="1"> <caption>Estimated data from the graph in Table 2</caption> <thead> <tr> <th>Время, часы</th> <th>Контрольный (Изменение массы, %)</th> <th>Полипласт Оптима 1% (Изменение массы, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>5</td><td>-1.2</td><td>-1.0</td></tr> <tr><td>10</td><td>-2.2</td><td>-1.6</td></tr> <tr><td>15</td><td>-2.8</td><td>-2.0</td></tr> <tr><td>20</td><td>-3.1</td><td>-2.3</td></tr> <tr><td>25</td><td>-3.3</td><td>-2.5</td></tr> </tbody> </table>		Время, часы	Контрольный (Изменение массы, %)	Полипласт Оптима 1% (Изменение массы, %)	0	0.0	0.0	5	-1.2	-1.0	10	-2.2	-1.6	15	-2.8	-2.0	20	-3.1	-2.3	25	-3.3	-2.5
Время, часы	Контрольный (Изменение массы, %)	Полипласт Оптима 1% (Изменение массы, %)																					
0	0.0	0.0																					
5	-1.2	-1.0																					
10	-2.2	-1.6																					
15	-2.8	-2.0																					
20	-3.1	-2.3																					
25	-3.3	-2.5																					

Как видно из полученных данных, введение добавки «Полипласт Оптима» в количестве 1% позволило избежать появления трещин в раннем возрасте, а также снизило потерю влаги на 15% в сравнении с контрольным образцом.

#### Закключение

В результате проведенного исследования усадочных деформаций модифицированного бетона выявлены причины образования трещин и способы их устранения; выполнено обобщение причин образования различного рода трещин в зависимости от их происхождения.

Показана высокая эффективность применения SRA-добавок, в частности «Полипласт Оптима», для снижения деформаций усадки как бетонной смеси, так и затвердевшего бетона. Сделан вывод о том, что добавка «Полипласт Оптима» снижает деформации усадки бетона в 1,5...2,4 раза при влажности среды 60 и 80%; эффект более выражен при влажности 60%, соответствующей отсутствию влажностного ухода за бетонной конструкцией.

Показано уменьшение усадки при применении С/А модификаторов при влажности 80%, то есть при наличии влажностного ухода. При влажности 60% усадка бетона С/А модификатором соответствует усадке контрольного состава. В полном соответствии с литературными данными SRA-добавка «Полипласт Оптима» замедляет темп набора прочности бетона, в частности на 7,5% в возрасте 28 суток твердения. Это должно быть учтено при подборе состава бетона.

Применение добавки «Полипласт Оптима» может быть рекомендовано для бетонирования сооружений, в том числе массивных, к которым предъявляются повышенные требования по трещиностойкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В.В. Тур. – Брест, 1998. – 245 с.

2. Цилосани, З.Н. Усадка и ползучесть бетона / З.Н. Цилосани. – Тбилиси : Мецниерба, 1963.
3. Александровский, С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. – М., 1973. – 46 с.
4. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М. : Стройиздат, 1971. – 207 с.
5. Десов, А.Е. Некоторые вопросы теории усадки бетона / А.Е. Десов // Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. – М. : Стройиздат, 1973.
6. Улицкий, И.И. Определение величин деформаций ползучести и усадки бетонов / И.И. Улицкий. – Киев, 1963.
7. Voellmy, A. Influence du temps sur la deformation du beton / A. Voellmy // Rizem Bulletin. – 1960. – № 9.
8. Leviant i Einfluss der Betonzusammen-setzung auf daz Swinder // Betonzustein-Zeitung. – 1964. – 30.
9. Блещик, Н.П. К построению расчетной модели усадки цементного камня с позиций физико-химической механики дисперсных систем / Н.П. Блещик, А.Н. Рак, М.Н. Рыскин // Вестн. БГТУ, Строительство и архитектура, Приложение – Материалы XI Междунар. науч.-метод. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь». Ч. 2. – Брест, 2004. – С. 81–93.
10. Блещик, Н.П. Расчетные модели усадки бетонных и железобетонных конструкций / Н.П. Блещик, А.Н. Рак, М.Н. Рыскин // Вестн. БГТУ, Строительство и архитектура, Приложение – Материалы XI Междунар. науч.-метод. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь». Ч. 2. – Брест, 2004. – С. 93–103.
11. RILEM TC 107, Subcommittee 5 : “Data base on creep and shrinkage”, RILEM Draft report, principal authors : H.S. Muller, Z.P. Bazant and C.H. Kuttner. –1998. – P. 395–398.
12. Исследовать реологические, структурные, физико-механические и технологические свойства самоуплотняющихся бетонов, обеспечивающие увеличение производительности труда при укладке бетонной смеси, снижение удельных затрат энергии и стоимости отделочных работ. Разработать и внедрить комплект нормативно-технической документации. Этап 7.06.02. Исследовать физико-механические свойства самоуплотняющихся бетонов : отчет о НИР (промежуточный) / Бел НИИС ; рук. Н.П. Блещик. – Минск, 2006. – 120 с. – № ГР 20053269.
13. Desing of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Building : Eurocodez EN 1992-2-1 ; Commition of European Communities, Des 1991. – 253 p.
14. Национальный комплекс нормативно-технических документов в строительстве. Строительные нормы Республики Беларусь. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02. – Введ. 01.07.2003. – Минск : М-во архитектуры и строительства, 2002. – 274 с.
15. Desing of concrete structures. Part 1 : General Rules and Rules for Building : Eurocodez : DIN EN 1992-1-1:2005-10 ; Commition of European Communities, 2005. – 248 p.
16. Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions / M. Collepardi [et al.] // Cement and Concrete Composites. – 2005. –Vol. 27, Iss. 6. – P. 704–708.
17. Lopes, Anne N.M. ; Silva, Eugênia F. ; Dal Molin, Denise C.C. ; Toledo Filho, Romildo D. Shrinkage-Reducing Admixture : Effects on Durability of High-Strength Concrete // ACI Materials Journal. – 2013. – Vol. 110, Jul/Aug. Iss. 4. – P. 365–374.

Поступила 11.06.2018

## SHRINKAGE DEFORMATIONS OF MODIFIED CONCRETE. CAUSES AND REMEDIES

N. KALINOUSKAYA, D. KOTOV, A. SHCHARBITSKAYA

*The reasons for the formation of various types of cracks in concrete structures, the influence of such deformations on their operational properties and durability are considered. The results of the analysis of the causes of the appearance of internal stresses, leading to crack formation in the elements taking into account all stages of its production, are presented. The data on the effect of SRA additive on the loss of moisture from a concrete mixture at the age of up to 20 hours are given as well as a comparison of the appearance of cracks in a concrete of a freshly molded sample in comparison with the no-additive composition of concrete.*

**Keywords:** *modified concrete, shrinkage of concrete, cracking, expanding additives, SRA additives, strength kinetics.*